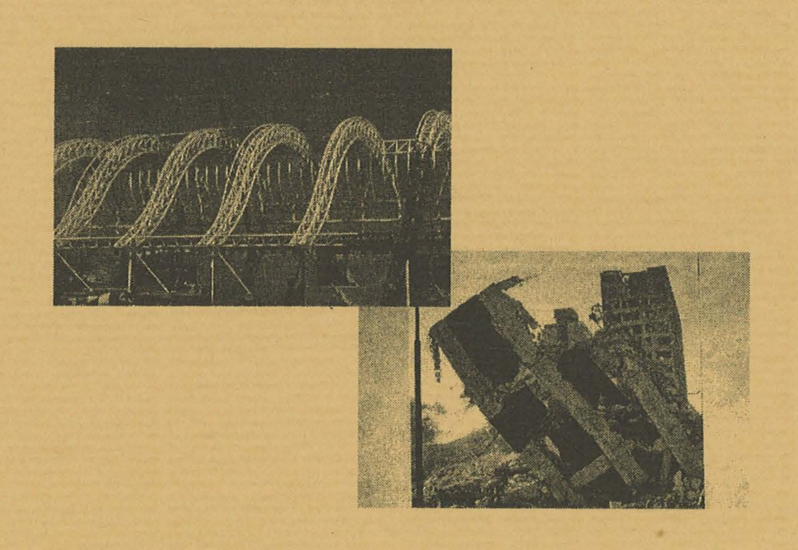
¿QUÉ ES ESTRUCTURA?

por

RICARDO AROCA HERNÁNDEZ-ROS

[1-16-08]



CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA
DE LA *ESCUELA DE*
ARQUITECTURA
DE MADRID

¿QUÉ ES ESTRUCTURA?

por

RICARDO AROCA HERNÁNDEZ-ROS

[1-16-08]

CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA
DE LA *ESCUELA DE*
ARQUITECTURA
DE MADRID

CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA

0 VARIOS
1 ESTRUCTURAS
2 CONSTRUCCIÓN
3 FÍSICA Y MATEMÁTICAS
4 TEORÍA
5 GEOMETRÍA Y DIBUJO
6 PROYECTOS
7 URBANISMO
8 RESTAURACIÓN

NUEVA NUMERACIÓN

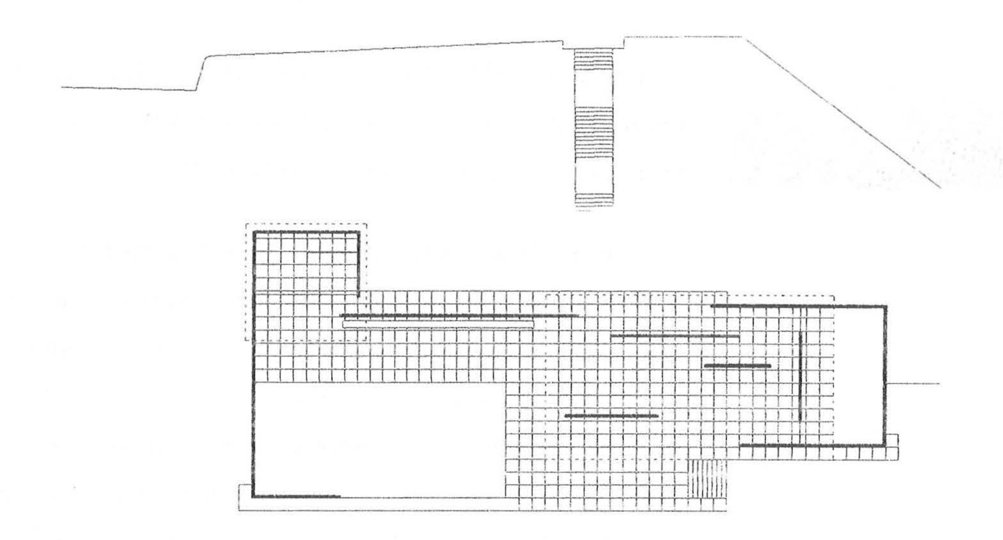
1 Área
16 Autor
08 Ordinal de cuaderno (del autor)

¿Qué es estructura?

Instituto Juan de Herrera.
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.
Edición a cargo de: Mª Concepción Pérez Gutiérrez
Composición y maquetación: Daniel Álvarez Morcillo.
CUADERNO 60.01 / 1-16-08
ISBN: 84-89977-98-4
Depósito Legal: M-36758-1999

¿QUÉ ES ESTRUCTURA?

La palabra **Arquitectura** para nosotros tiene una significación obvia, e incluso podríamos considerar que es una palabra *reservada*, es decir, que no debe emplearse en otro contexto; en realidad se emplea en el sentido de *Orden Superior*. La *arquitectura de microprocesadores* es un ejemplo del empleo del término con sentido bastante alejado del nuestro.



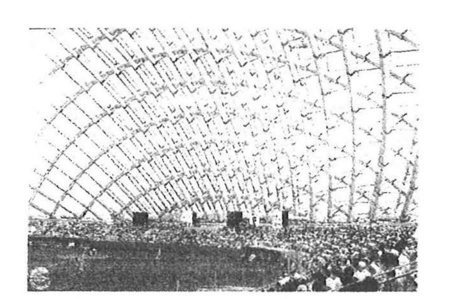
El término **estructura** se emplea frecuentemente para designar el orden interno —y con frecuencia escondido o no evidente— de las cosas.

Su abanico de significados es muy amplio: desde **estructura organizativa** a **estructura económica**, **estructura interna**... También son abundantes términos derivados como **infraestructura**, **superestructura**...

En el contexto de las estructuras de edificación se emplea el término *estructura* en relación con las agresiones de tipo mecánico que sufre cualquier objeto real por el mero hecho de existir y usarse; **llamamos estructura resistente a aquella parte del objeto que le permite tener una esperanza razonable de mantener la integridad física y la forma en condiciones normales de uso.**

Haremos extensivo a veces el término estructura a un conjunto de características que sin necesidad de la existencia de una estructura diferenciada juegan el papel de ésta.

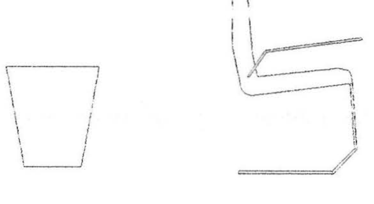
La necesaria existencia de una estructuración resistente impone condicionantes rigurosos a la arquitectura real y es de hecho un importante factor de orden a la vez que ha sido hasta bien entrado el siglo XX el mayor reto con el que se enfrentaba la edificación.



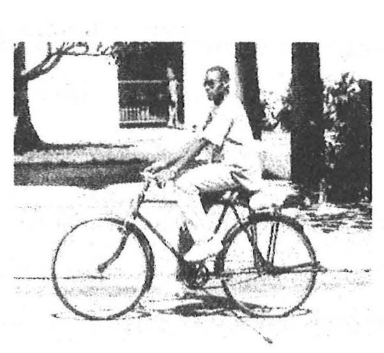
Actualmente, el reto técnico es de orden menor: podemos fabricar construcciones mucho mayores de lo necesario y predecir su comportamiento con gran precisión.

En edificación el problema real hoy día es el de asignar el diseño y construcción de los recursos necesarios para cumplir la función estructural con un coste razonable.

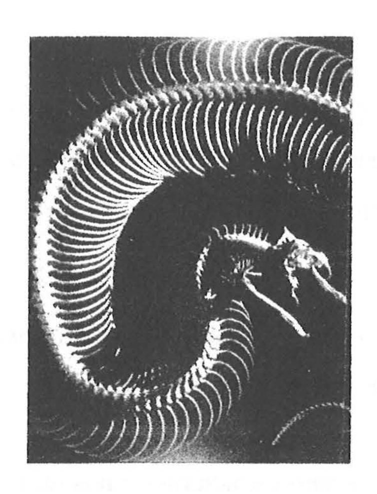
Hay que dotar de estructura o al menos de estructuración resistente a los edificios en un contexto de conocimiento en el que el comportamiento de cualquier solución estructural es predecible; pero para cada problema hay una infinidad de soluciones alternativas que tienen sus consecuencias económicas, técnicas y sobre todo una expresión geométrica concreta que o bien forma parte de la solución arquitectónica o bien puede ser ocultada: aun en ese caso necesita un espacio geométrico que no puede ser determinado de forma arbitraria.



No estamos solos en el problema: otros productores de objetos, desde aeroplanos a vasos de papel, pasando por automóviles y sillas, tienen el mismo problema. Los fabricantes de objetos móviles lo tienen más complicado ya que las reglas del equilibrio dinámico son más complejas que las del estático, a lo que se agrega la necesidad de que el objeto producido y por ende su estructura tenga la menor masa posible, requisito no necesario —ni siquiera conveniente— en Arquitectura.



También los seres vivos comparten el problema; tanto los estáticos como las plantas, como los que se mueven, como los animales, deben cumplir unos requisitos de resistencia y mantenimiento de forma para sobrevivir.



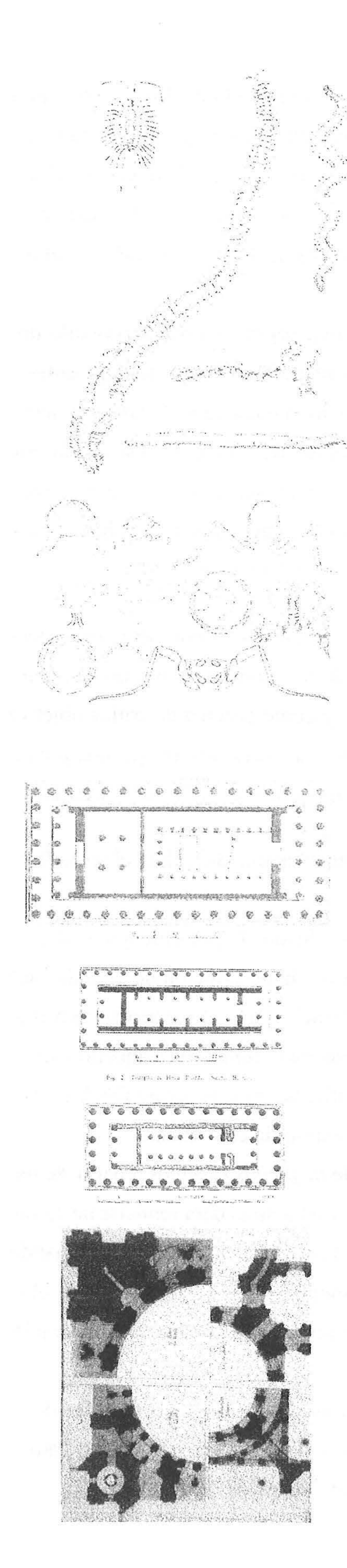
Puestos a tratar de establecer un método de diseño estructural, —para asegurar la supervivencia frente a agresiones mecánicas—, parecería que la imitación del método de la naturaleza, que ha conducido a diseños de un asombroso refinamiento y una gran eficacia sería la forma de llegar a parecidos resultados.

El método es además sencillo: ***prueba y error*** **partiendo de pequeñas modificaciones aleatorias de un modelo anterior**, acompañado de un método inapelable de crítica objetiva que permite elegir las variantes más eficaces: la **selección natural** — especie de economía de mercado a lo bestia— que sólo permite retener los diseños cuyos portadores han conseguido reproducirse antes de ser devorados.

La selección natural como método de diseño tiene dos aspectos excelentes: lo azaroso de las modificaciones no deja ninguna posibilidad sin barrer y como sistema de crítica objetiva es implacable salvo las contadas ocasiones en que una población queda aislada sin competidores en un entorno cerrado.

Tiene no obstante inconvenientes que dificultan el tomarlo como modelo a imitar:

- Está frecuentemente condicionado por el lenguaje que transmite —con errores— la descripción de un individuo a otro: y como consecuencia, tanto el repertorio de materiales como el de formas están limitados a aquello cuya fabricación puede codificarse en el lenguaje DNA y producirse mediante un proceso de crecimiento.
- La propia definición de *pequeños cambios* a partir de un modelo, no permite la vuelta atrás para reiniciar un camino más prometedor —la naturaleza lo resuelve aportando simultáneamente innumerables líneas alternativas de desarrollo que en un momento dado puedan sustituirse unas a otras—.
- Requiere una enorme cantidad de tiempo, del orden de cientos de miles de años, con frecuencia millones, para producir cambios significativos de diseño.



La perfección de algunas formas vivas es sorprendente, pero no debe olvidarse que el proceso de desarrollo biológico en la tierra está en marcha desde hace casi cuatro mil millones de años.

Descartado por falta de tiempo el procedimiento de prueba y error, cabe pensar en emplear los procedimientos habituales de diseño, que no son más que una versión abreviada de la selección natural:

En cada caso y con la referencia de soluciones anteriores, se aventura un diseño y se comprueba su solidez.

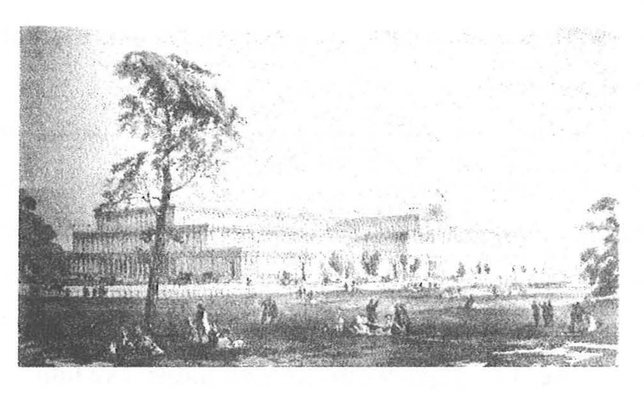
La única diferencia entre el diseño estructural y otras ramas del diseño es que en el caso de las estructuras resistentes existe un método de crítica objetiva extremadamente elaborado que al predecir con precisión el comportamiento de cualquier estructura permite desarrollar el proceso evolutivo en el papel evitando dispendios y catástrofes, —aunque como veremos sólo es realmente previsible sin grandes costes el comportamiento de estructuras que no difieren excesivamente de otras construidas y probadas— .

Para mejorar la convergencia del proceso acortando los ciclos de prueba y error pueden además emplearse reglas de diseño obtenidas a través del estudio de problemas genéricos.

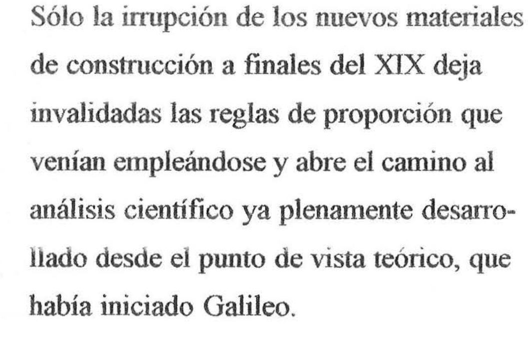
Se han usado siempre *reglas de proporción* que aseguraban a la vez la correcta composición y el buen funcionamiento estructural basadas en la experiencia ya que no empieza a desarrollarse una base científica clara hasta mediados del XVII

El conjunto de órdenes clásicos supone un lenguaje arquitectónico en toda la acepción de la palabra, que conlleva, entre otros contenidos, que no es el momento de desarrollar, un correcto funcionamiento de la estructura.
La pérdida medieval del lenguaje clásico acaba traduciéndose en la construcción gótica en un nuevo conjunto de reglas de

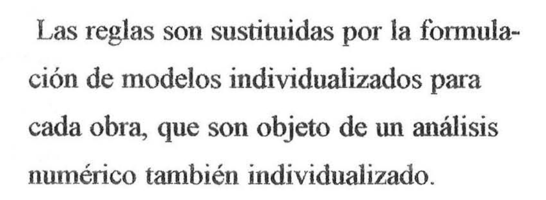
proporción, con la diferencia respecto a los lenguajes clásicos de que las reglas no se explicitan y son transmitidas dentro de círculos cerrados de constructores que aseguran así su dominio del mercado —obviamente, las reglas son deducibles de los propios edificios ya construidos y a ello se aplican los cultivadores del renacimiento cientifista gótico que se produce en el siglo XIX. No es sólo un revival estilístico sino el desarrollo de la convicción de que *el gótico* es técnicamente superior como sistema constructivo.



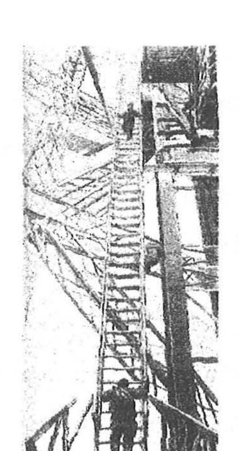
La continuidad de las reglas durante cientos de años se explica porque no hay cambios en los materiales de construcción aunque sí los haya en las técnicas de puesta en obra.

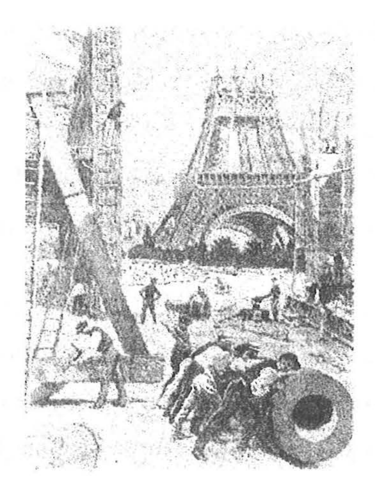


Sólo la irrupción de los nuevos materiales de construcción a finales del XIX deja invalidadas las reglas de proporción que venían empleándose y abre el camino al análisis científico ya plenamente desarrollado desde el punto de vista teórico, que había iniciado Galileo.



Las reglas son sustituidas por la formulación de modelos individualizados para cada obra, que son objeto de un análisis numérico también individualizado.





En lo material se produce un salto entre los nuevos materiales estructurales y las reglas de composición de los arquitectos que da lugar a la generalización de la estructura resistente diferenciada y oculta. Sólo jardineros como Paxton e ingenieros como Eiffel son capaces de emplear los nuevos materiales sacando partido de sus posibilidades reales.

LA CIENCIA DE LAS ESTRUCTURAS

El origen del tratamiento científico del problema estructural, puede situarse con extraordinaria precisión:
En 1638 —un año después de que Descartes publique "El Discurso del Método"— Galileo, viejo y enfermo, sometido a vigilancia después de haber abjurado públicamente del error de propagar el modelo copernicano del sistema solar, buscando temas no comprometidos a los que aplicar su poderosa inteligencia, publica el "Diálogo de dos Nueva Ciencias", en el que establece las bases del estudio científico de los problemas estructurales.
En su sistemático y demoledor análisis de todo conocimiento comúnmente admitido o basado en argumentos de autoridad —generalmente de Aristóteles—pone en crisis las reglas de proporción con una sencilla demostración de que las tensiones crecen inexorablemente con el tamaño. Lo expresa con la lapidaria frase: **Los gigantes no pueden haber existido.**
—De hecho, el que las tensiones debidas al peso propio crezcan inexorablemente con el tamaño, lo que es cierto, no invalida en absoluto las reglas de proporción en el diseño de estructuras, dados los moderados valores de las tensiones y tamaños que se manejan en las edificaciones reales. La observación de Galileo sólo es pertinente para tamaños muy superiores a los que habitualmente se manejan para cualquier tipo estructural y en la práctica sólo es relevante en los grandes puentes—.

El tratado de Galileo no tiene influencia alguna en la construcción, que sigue empleando sus propias reglas, pero pone en marcha el proceso de análisis científico que recibe un fuerte impulso cuando Hooke en el s. XVII formula el Principio de *proporcionalidad entre tensiones y deformaciones*.

La puesta a punto del cálculo infinitesimal por Leibnitz y Newton acelera el proceso de cristalización del cuerpo teórico del análisis, impulsado no por ingenieros, que aún no existían, sino por matemáticos que encontraban en el análisis de

vigas buenos ejemplos para formular y resolver ecuaciones diferenciales.

Euler, a mediados del s.XVIII descubre el pandeo de barras en el curso de un razonamiento teórico mucho antes de que se produzcan observaciones conscientes del mismo; y da una solución que se continúa empleando en la actualidad.

En el s. XIX la Ecòle Politecnique en la que sobresale Navier encamina el análisis a aplicaciones prácticas.

Hasta bien entrado el s. XX la situación es curiosa:

Las bases teóricas del análisis de estructuras están perfectamente establecidas, los modelos consolidados y el gran obstáculo para su aplicación es que en muchos casos el manejo del aparato numérico supone un obstáculo insuperable. El diseño queda relegado al cálculo hasta el punto de que llegan a emplearse estructuras menos eficaces simplemente porque pueden *calcularse*.

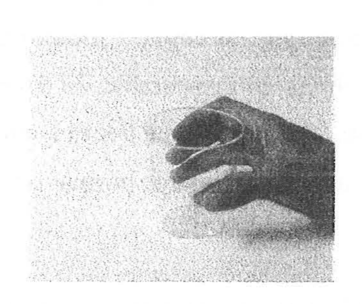
A partir de los años 60 los ordenadores resuelven progresivamente los problemas de cálculo numérico y actualmente puede y debe ponerse un mayor énfasis en el diseño, aunque los programas de ordenador están introduciendo limitaciones artificiales en el diseño semejantes a las que en otras épocas produjeron los procedimientos de cálculo.

REQUISITOS ESTRUCTURALES.

No es fácil definir de una manera inequívoca los criterios que permiten decidir la bondad relativa de varias soluciones estructurales posibles ya que difícilmente un problema se plantea en términos exclusivamente estructurales y factores relacionados con la mayor o menor adecuación a otros criterios que caen fuera del campo de las estructuras son con frecuencia —y es lógico que así sea— determinantes en las decisiones de diseño estructural.

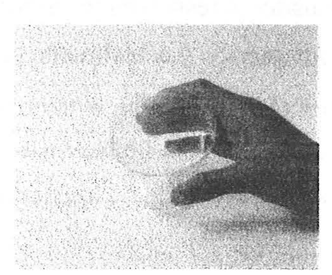
RESISTENCIA
RIGIDEZ
ESTABILIDAD

No obstante, sí pueden objetivarse los **requisitos estructurales** que debe necesariamente cumplir cualquier objeto y que se resumen en tres: **resistencia**, **rigidez**, y **estabilidad**.



Cualquier objeto debe ser suficientemente resistente, rígido y estable para las condiciones de uso previsibles, es decir:

No debe romperse, no debe sufrir un cambio de forma que lo haga inútil y debe de tratar de recuperar la situación de equilibrio cuando se le separa de ella.



Un vaso de plástico sirve para proporcionar un fácil ejemplo:

Resistencia:

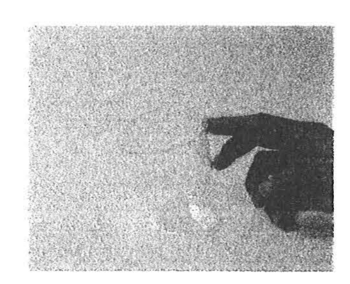
- El vaso no debe romperse ni cuando se le llena de agua ni al cogerlo y levantarlo.

Rigidez:

- El cambio de forma al llenarlo y al sufrir la presión de la mano al sujetarlo debe mantenerse dentro de lo razonable.

Estabilidad:

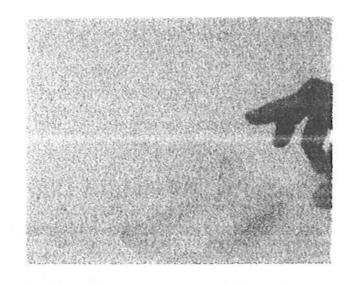
- Cuando se posa sobre la mesa, si se le inclina, no debe volcarse.

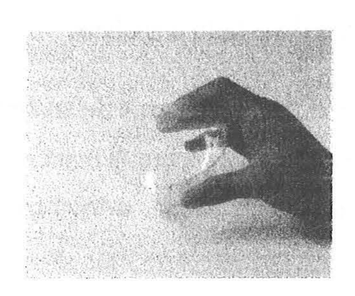


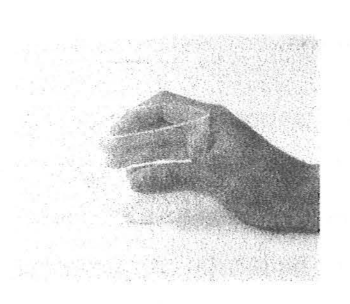
Ninguno de los requisitos es absoluto y siempre debe existir una referencia a las *condiciones posibles de uso*; en efecto:

- Por grande que sea la base del vaso y por pesado que sea su fondo, si se le inclina mucho se volcará.

No es posible conseguir la estabilidad absoluta ni todos los



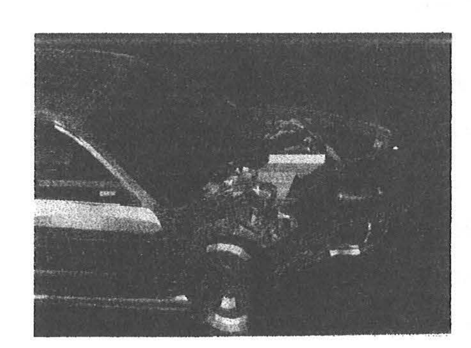




diseños de vaso serán igualmente estables; el vaso debe ser suficientemente estable, e incluso en este caso que no implica riesgo queda finalmente al arbitrio del fabricante que ya verá lo que le conviene.

- Según lo rígido que sea el vaso se deformará de una manera más o menos perceptible; los vasos de vidrio serán más rígidos, los de plástico menos, dependiendo del material y el diseño. Algunos de los existentes en el mercado están por debajo de la mínima rigidez exigible para usarlos sin poner mucho cuidado, lo que para muchos empresarios se compensa con creces por un reducido precio.
- Nada es irrompible. Un vaso de plástico puede romperse fácilmente con la mano, uno de cristal tal vez necesite ser arrojado al suelo; en todo caso, para romperlos hará falta aplicar condiciones no razonables de uso.

Resistencia, rigidez y estabilidad, con las matizaciones que puedan establecerse sobre cuáles son las condiciones de uso son requisitos ineludibles que deben ser cumplidos, y en el caso de la edificación, las condiciones de uso están establecidas mediante normativas con rango legal dadas las graves consecuencias que puede tener un fallo estructural.



Puede haber otros requisitos, por ejemplo los automóviles en el caso de un choque deben deformarse de forma controlada para minimizar las consecuencias del impacto.

En el caso de un terremoto intenso o de un incendio, los edificios deben evitar un derrumbamiento súbito aunque queden inservibles.

LA ESTRUCTURA RESISTENTE.

El proceso de comprobación del cumplimiento de los requisitos estructurales, el *análisis de estructuras* —impropiamente se suele emplear el término *cálculo*— está muy desarrollado, pero precisa una previa definición del objeto a analizar.

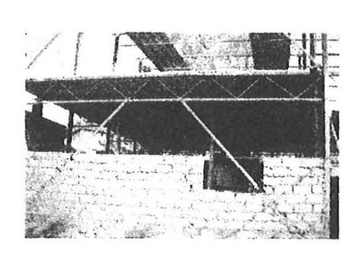
Antes de entrar en una descripción de los procesos de análisis no es ocioso hacer algunas consideraciones sobre la manera de conseguir que un objeto cumpla los requisitos estructurales:

Objetos estructuralmente válidos.



Algunos objetos o parte de ellos, sea por el proceso de fabricación o como consecuencia del cumplimiento de condiciones no estructurales, ya son suficientemente resistentes, rígidos y estables: por ejemplo los tabiques de ladrillo, por razones acústicas, son suficientemente resistentes, rígidos y estables si su altura no es muy grande.

Objetos en los que los requisitos estructurales se traducen sólo en algunas exigencias formales o dimensionales:
Por ejemplo un muro de carga sólo precisa tener un canto igual o superior a 1/20 de la altura; los vasos de plástico consiguen la adecuada rigidez simplemente con algunas plegaduras; la carrocería de un automóvil de serie se hace estructuralmente eficaz con plegaduras y curvas en la chapa.



Objetos con estructura diferenciada:

Si el cumplimiento de los requisitos estructurales se encomienda a una parte específica del objeto, se llama a esta parte —que no tiene necesariamente que existir— **estructura**.

La estructura diferenciada permite emplear materiales más eficaces y además cuidar en mayor medida su diseño, de manera que siempre se obtienen soluciones que emplean menor cantidad de material, lo que no es sinónimo de *la mejor solución posible*.

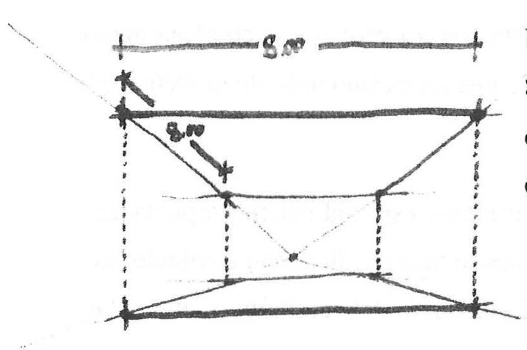
Si los elementos de definición espacial tienen propiedades aprovechables, es razonable hacerlo, llegando a soluciones mixtas, habituales en la industria del automóvil y obligadas en la aeronáutica.

Un automóvil de serie aprovecha ampliamente las posibilidades estructurales de la carrocería de chapa. Un automóvil de competición posee generalmente una estructura diferenciada de tubos, complementada a efectos de rigidez con parte de los elementos de definición espacial e incluso con el propio motor.

Los edificios suelen tener una estructura diferenciada de acero, hormigón armado o madera, pero en construcciones de pocas plantas puede aprovecharse la capacidad resistente de los muros de cerramiento.

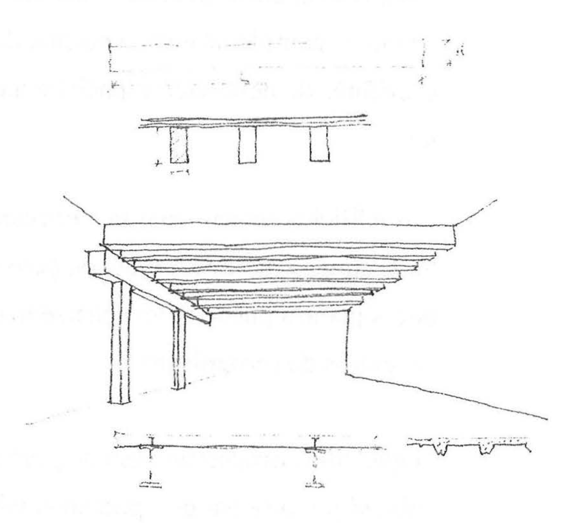
Si queremos diseñar un vaso de peso mínimo —de dudosa utilidad por otra parte— podemos fabricar un aro con trípode de titanio y colgar de su borde una bolsa de finísimo plástico, diferenciando la función estructural de la de contenedor de líquido.

LA FORMA DE LAS ESTRUCTURAS DE EDIFICACIÓN.

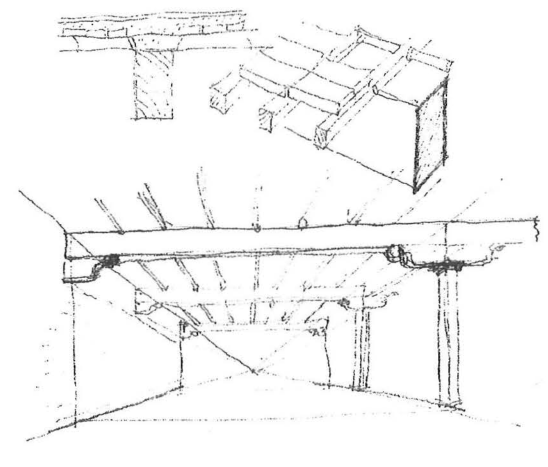


Un problema elemental como cubrir una superficie de 8,00 x 8,00 m^2 da lugar a un repertorio formal tan amplio como se quiera. Sin ánimo de ser limitativo se esbozan a continuación varias soluciones:

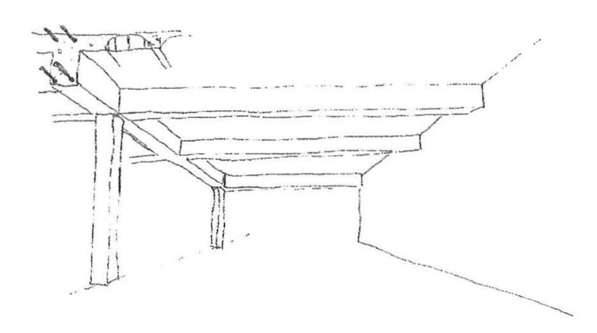
1.- Una solución de vigas paralelas de madera o perfiles laminados que a su vez pueden apoyar en muros o en pórticos.



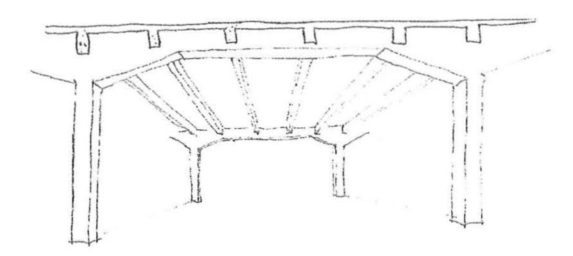
2.- Puede matizarse más la solución con dos órdenes de vigas, que en el caso de la madera requerirán un cierto cuidado en el diseño de los apoyos.



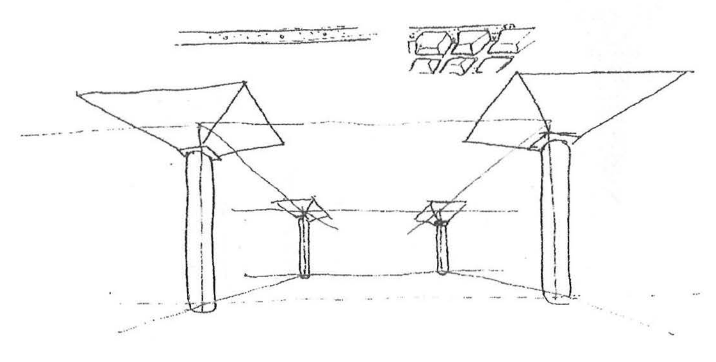
3.- El uso de hormigón armado llevaría a una solución semejante en que uno de los órdenes sería asumido por un forjado.



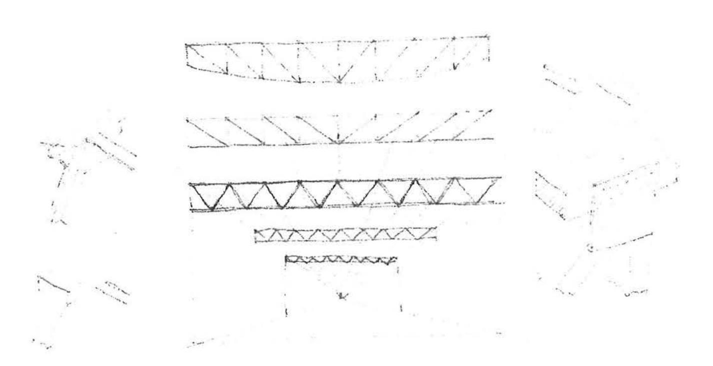
4.- El hormigón armado permitiría también diseñar soluciones acarteladas, caso de tratarse de un módulo una estructura continua.



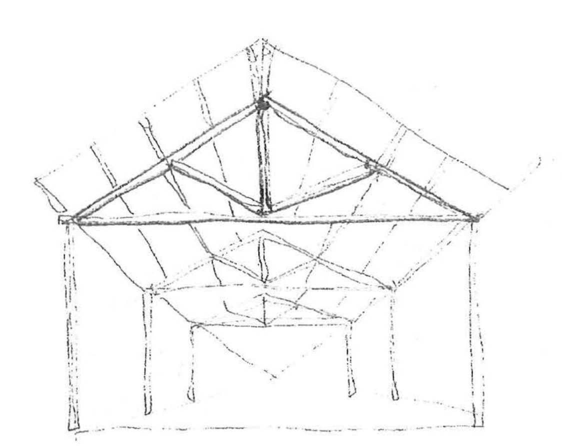
5.- Alternativamente es posible emplear una losa, que para ese tamaño debería razonablemente estar aligerada. Su eficacia mejoraría con capiteles sobre los soportes; la mejora juega contra una mayor complejidad del proceso de construcción y sólo sería posible si hay compatibilidad entre los capiteles y el uso.



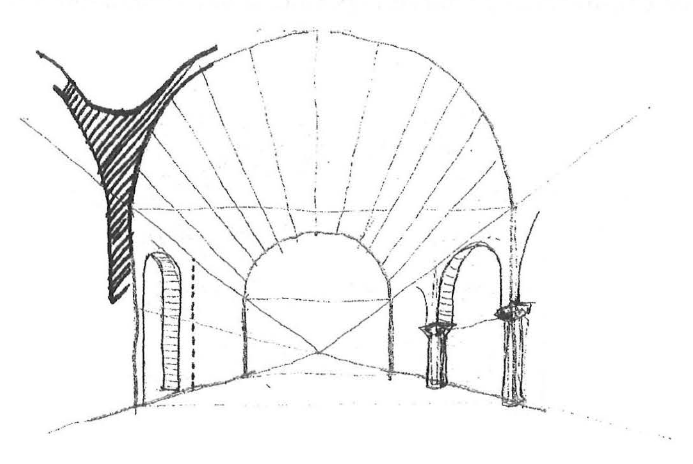
6.- Son también posibles diversas variantes de vigas trianguladas que permiten conseguir una mayor economía de material contra un aumento de la complejidad de la ejecución.



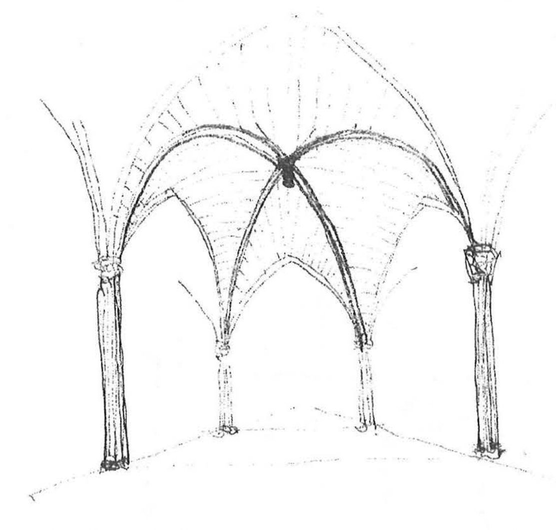
7.- Si se trata de una cubierta, una sencilla cercha —en este caso la llamada *cuchillo español*, da una solución razonable con múltiples variantes constructivas posibles en madera y acero.



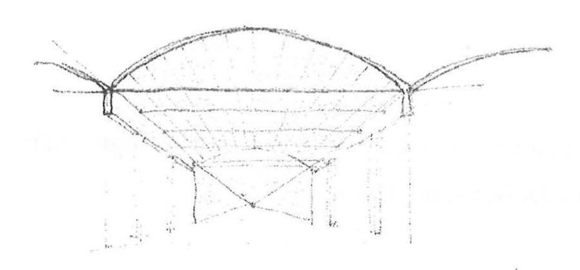
8.- En la Baja Edad Media el problema hubiera sido resuelto con una bóveda de cañón apoyada sobre muros o arquerías.



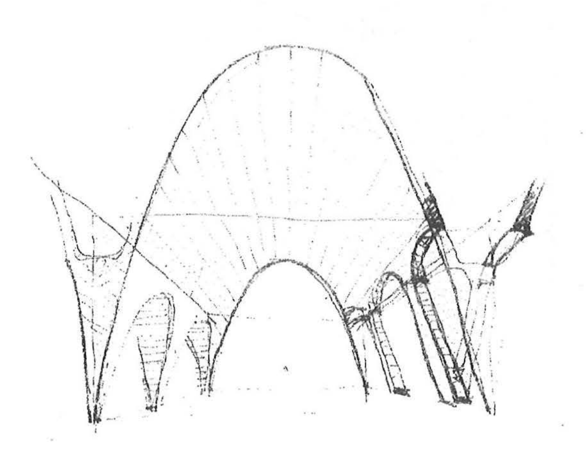
9.- La orden de císter desarrolló un sistema de nervioscruzados que dio lugar a la llamada construcción gótica, con grandes ventajas constructivas y de ahorro de material respecto a cualquier precedente.



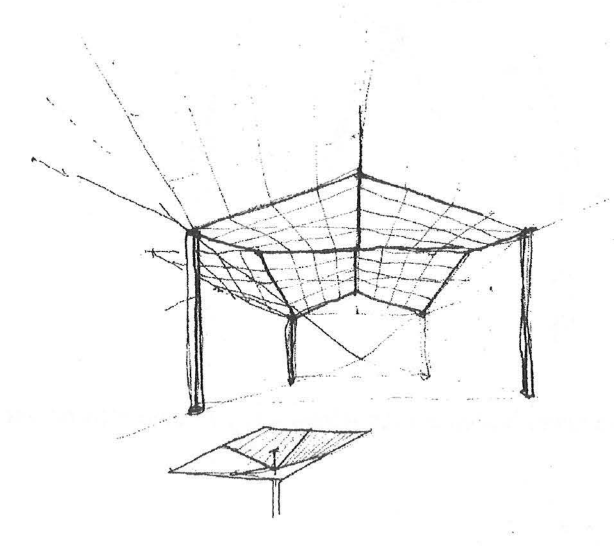
10.- El hormigón armado permite hacer bóvedas más rebajadas, y mucho más delgadas, con o sin tirantes.



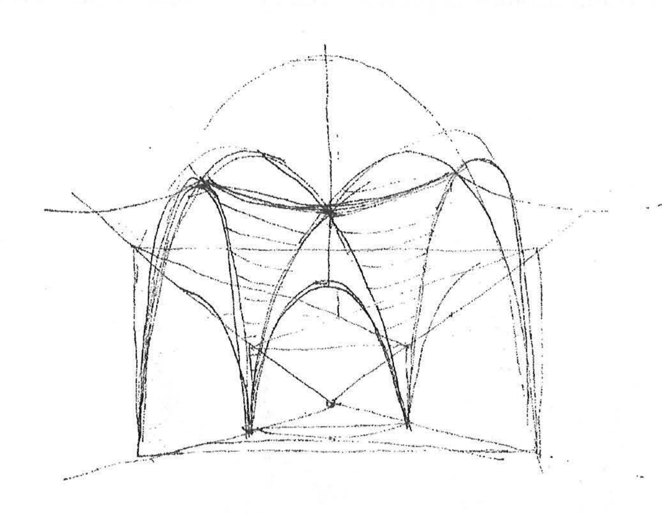
11.- La adopción de una sección parabólica presenta ventajas respecto a las bóvedas de sección cilíndrica.



12.- La doble curvatura da lugar a la forma del paraboloide hiperbólico, que a su vez permite diversas variantes de bordes rectos.



13.- Los paraboloides pueden cortarse con bordes parabólicos, aunque realmente la solución dibujada sólo sería adecuada para tamaños bastante mayores.



LA COMPLEJIDAD.

El intento de diseñar estructuras con el menor volumen posible de material conduce en general a diseños complejos.

El equilibrio entre el ahorro de material y el coste de la complejidad depende de las circunstancias concretas.
En la mayor parte de los casos, las estructuras trianguladas formadas por barras —elementos en que una de las dimensiones predomina claramente sobre las otras dos— pueden dimensionarse estrictamente lo que permite conseguir soluciones con menor consumo de material que las continuas pese a que en éstas a veces puede hacerse trabajar el mismo material en más de una dirección —pueden fabricarse materiales con características técnicas más elevadas: resistencia y rigidez, en elementos lineales que en las superficies o las tridimensionales—.

Puede afirmarse que dada una solución estructural siempre es posible diseñar una versión más compleja a base de barras con un menor volumen de material. El menor consumo de material no siempre significa menor coste: la complejidad añade a los costos la producción.

EL ANÁLISIS.
Una vez definida una forma geométrica y un material —o combinación de materiales— y establecidas las condiciones de uso, un proceso de análisis permite comprobar la validez de la apuesta que siempre supone cualquier diseño.

El estudio del problema estructural ha permitido desarrollar procedimientos para predecir con gran aproximación el comportamiento de las estructuras y en consecuencia comprobar previamente a su construcción si serán suficientemente resistentes, rígidas y estables.

Y no sólo puede predecirse el comportamiento para asegurar la deseable situación estática de los edificios, sino que los más complejos problemas dinámicos pueden ser simulados con gran precisión.

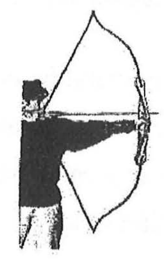
Lo mismo que la construcción de estructuras ya no es un reto técnico, tampoco lo es su análisis; ni siquiera el análisis de las situaciones más complejas está en ninguna de las fronteras del conocimiento científico.

Las cuestiones esenciales fueron formuladas y teóricamente resueltas en el s. XIX y los procesos numéricos asociados a la resolución de problemas particulares están disponibles desde el último tercio del siglo XX. El problema es pues tanto en el campo del diseño como en el del análisis, la asignación razonable de recursos, es decir, no construir una estructura más costosa de lo necesario y no gastar en un análisis más tiempo ni recursos de los precisos.

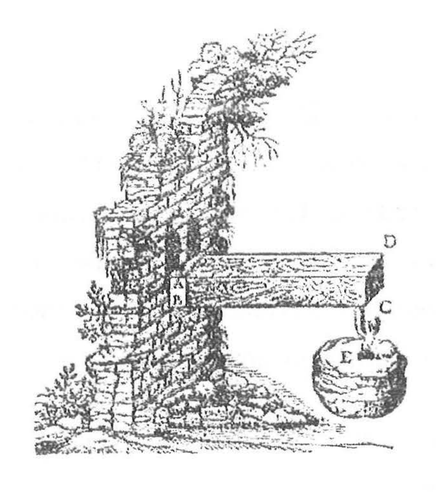
El análisis de las estructuras parte de dos principios:
1.- El objeto y cada una de sus partes deben estar en equilibrio para cualquier situación previsible de uso —en el caso de los edificios el equilibrio es obviamente estático—.

2.- El material y la geometría del objeto real son representados por un **modelo** que siendo lo más sencillo posible permita predecir con suficiente precisión el comportamiento del objeto.





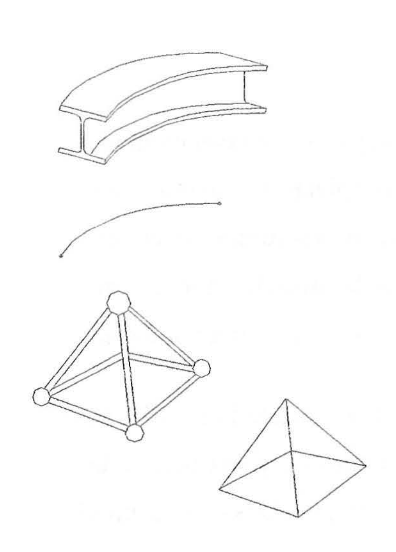
Al sustituir la realidad por modelos no se hace sino expresar de forma consciente el sistema por el que nuestro cerebro se relaciona con el mundo exterior; el sistema de visión construye en cada caso un modelo de lo que nos rodea a partir de la información fragmentaria recogida por la retina —que de hecho sólo permite percibir con gran precisión una pequeñísima área del campo visual—, y de la información previa almacenada en la memoria.



Incluso el color se aplica a la imagen percibida con mayor nitidez en blanco y negro a partir de una información mucho menos detallada de los sensores a los tres colores fundamentales, mucho más dispersos en la retina y mucho menos sensibles a la luz.

Los modelos implican **un sistema de información** y se componen de **una definición geométrica**, que puede o no llevar una **información numérica añadida**; **unas posibilidades de movimiento**; **un modelo de material** y **un modelo de acciones** consecuencia del uso.

Todo aquello que no tiene cabida en el modelo literalmente **no existe** y no es por tanto tenido en cuenta en las predicciones que se obtengan a partir de él.



Todos los modelos empleados en el análisis:

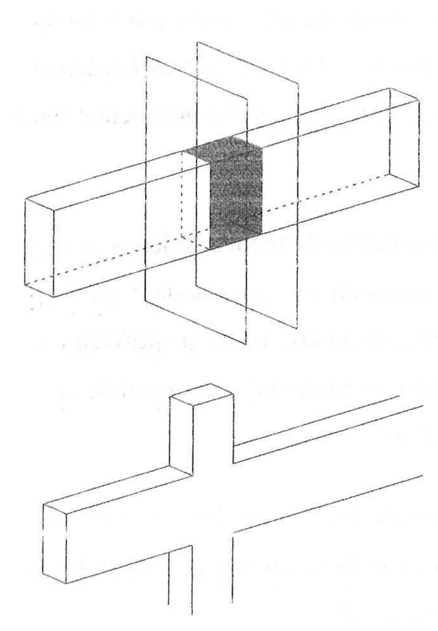
- geometría
- movimiento
- material
- acciones

son tan simples como sea posible ya que la sencillez no sólo acorta el análisis sino que además , y ello tal vez sea lo más importante, reduce las posibilidades de error.

Es aconsejable incluso la utilización de modelos muy simples en las primeras etapas de diseño para, una vez definido el objeto, asegurar su validez mediante el análisis de un modelo más complejo.

MODELOS GEOMÉTRICOS:

Estructuras de barras:

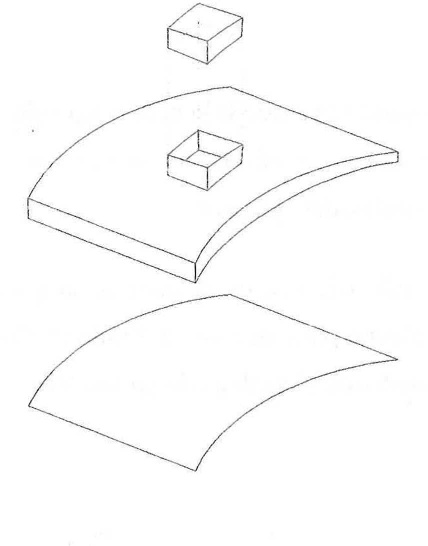


La **representación** más simple posible de una estructura es una línea —directriz— que une los centros de gravedad de las secciones del sólido que representa: se denomina **barra;** puede ser recta , curva plana o curva alabeada y puede llevar una información numérica añadida sobre las características de la sección — que a su vez pueden variar a lo largo de la barra—.

En una barra puede aislarse un elemento significativo median te un solo sistema de cortes:

Llamaremos estructura de barras a aquella formada por un conjunto de elementos que pueden ser representados con el modelo de barra. Llamamos **nudos** a los puntos de unión de las barras.

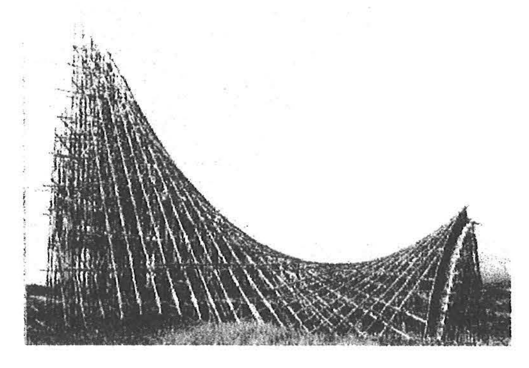
Estructuras superficiales.

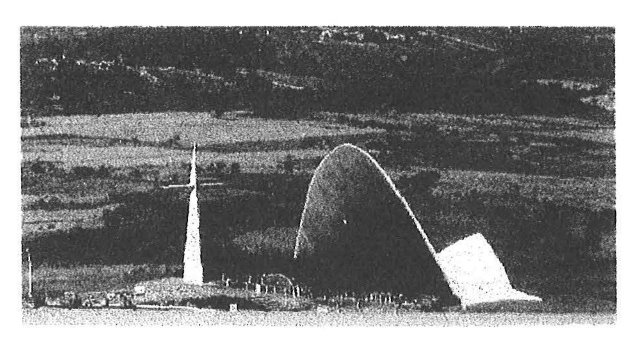


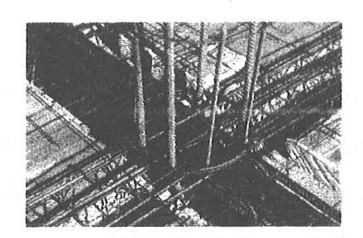
Es el modelo más complejo de los que se emplean en la práctica para representar estructuras completas; se sustituye un sólido tridimensional en el que una de las dimensiones sea mucho menor que las otras dos por la superficie media, que puede tener una expresión analítica o una definición digital.

Dentro de las estructuras superficiales cabe distinguir las planas y las curvas; y aun dentro de éstas caben múltiples diferenciaciones según el tipo de curvatura:

- simple curvatura —parabólicas—
- doble curvatura —elípticas—
- doble curvatura inversa —hiperbólicas—.







Modelos tridimensionales.

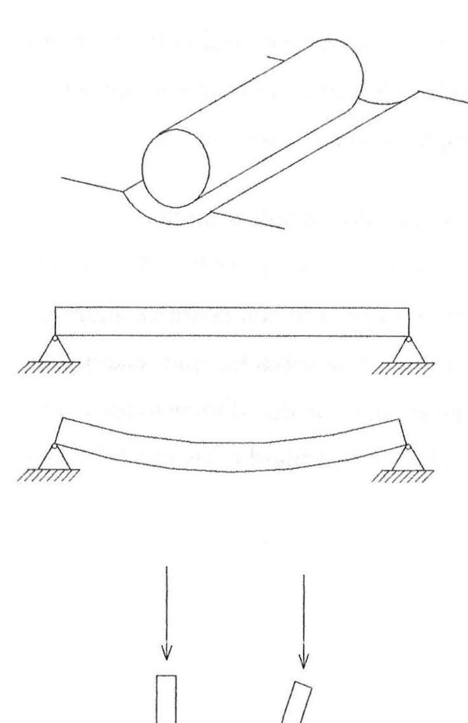
En ellos no hay simplificación geométrica: son necesarias tres familias de cortes para aislar un elemento significativo. Sólo se emplean para analizar en detalle partes de otras estructuras tales como **lo nudos** de una estructura de barras.

ESPACIO Y MOVIMIENTOS

Todas las estructuras reales están en un espacio de tres dimensiones, en el que es posible siempre un movimiento de seis componentes: tres de desplazamiento y tres de giro.

No obstante raramente es necesario emplear tantos parámetros. Con frecuencia el proceso de análisis lleva implícito un modelo de espacio en que sólo son posibles algunos movimientos. La mayor parte de los modelos que se emplean habitualmente están en un espacio de dos dimensiones y aun dentro de él tienen severamente restringidas las posibilidades de movimiento.

DEFORMACIONES.

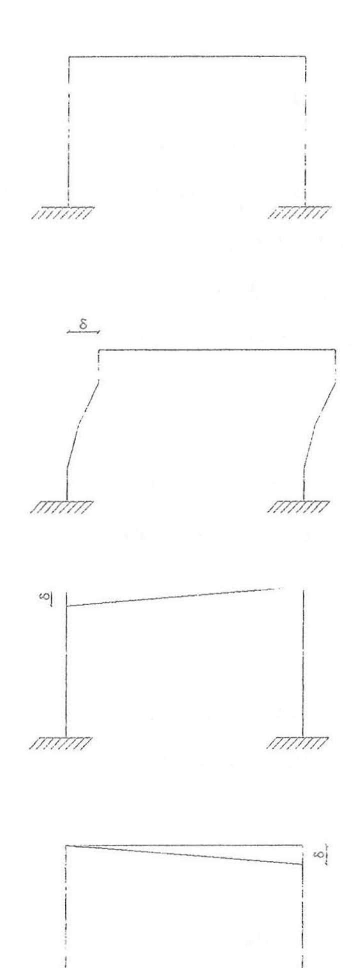


Además de las dimensiones del espacio en que se sitúa el modelo, éste debe incluir las posibilidades de movimiento relativo de los puntos de la estructura e incluso de los puntos de aplicación de las fuerzas implicadas en el proceso.
El modelo más simple de una estructura: el de **sólido indeformable** —impropiamente llamado sólido rígido— carece de parámetros para expresar la medida de los cambios de distancia entre puntos de una estructura que por tanto no tiene en conjunto más que tres posibles movimientos en el plano y seis en el espacio.
Pueden modelarse estructuras mediante varios sólidos indeformables que admiten alguna posibilidad de movimiento entre ellos —este modelo suele emplearse en el análisis de estructuras de **fábrica** de piedra o ladrillo—.

En el modelo de **sólido deformable** se incluyen parámetros para medir los cambios dimensionales de la propia estructura; es el modelo generalmente empleado, con la variante de considerar que los movimientos son pequeños y que el cambio de posición de las fuerzas, sean externas o internas es irrelevante, lo que conduce a un proceso de análisis denominado **análisis lineal o de primer orden**.

Si además consideramos el cambio de posición de las fuerzas al deformarse o moverse la estructura podemos realizar un **análisis no lineal o de segundo orden** inevitable para comprobar la **estabilidad** de una estructura.

Es obvio que cualquier estructura, por sencilla que sea, se mueve y se deforma en un espacio tridimensional y que ello implica necesariamente cambios de posición de las fuerzas implicadas en el equilibrio. No obstante, con modelos muy simples puede obtenerse con frecuencia la información relevante para diseñar o comprobar la validez de una estructura; naturalmente cuanto más simple es el modelo mayor es el riesgo de omitir algún parámetro relevante. Conviene recalcar



que una vez elegido el modelo sólo existe aquello que cuenta con un parámetro para expresar la medida de lo que sucede.

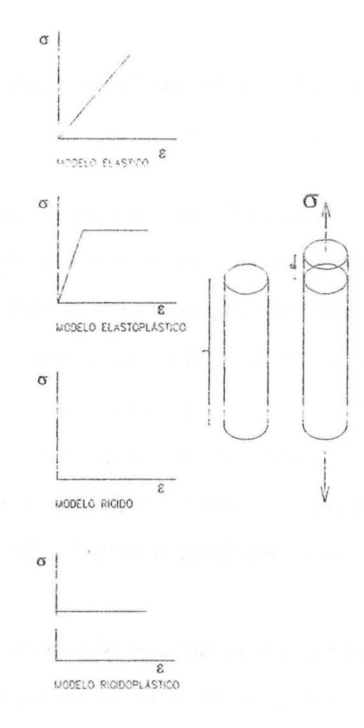
En un sólido deformable la expresión del movimiento es tan compleja como se quiera; aquí también suele usarse la simplificación de referir el movimiento de la estructura al de una serie de puntos significativos llamados **nodos** cuyos movimientos están limitados por las dimensiones del espacio que se haya elegido; pero a su vez pueden ser objeto de nuevas restricciones tales como suponer que sólo es significativo uno de los desplazamientos posibles o que los giros son irrelevantes.

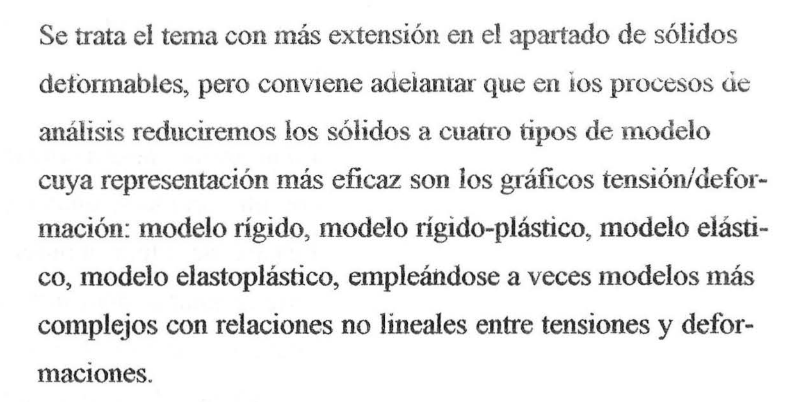
El conjunto de desplazamientos y giros que consideramos relevantes —y disponen por tanto en el modelo de parámetros para expresar su medida— se designa como **grados de libertad de la estructura**.

El aparato numérico necesario para analizar una estructura crece con el cuadrado del número total de grados de libertad, por lo que suele limitarse en lo posible siendo de aplicación el mismo razonamiento sobre los riesgos implícitos en la pérdida de información que se hizo al hablar de modelos de movimiento.

MODELOS DE MATERIALES.

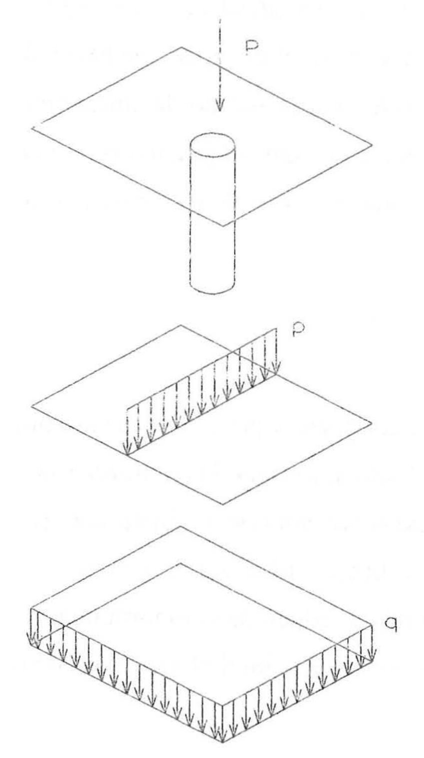
Un material real es siempre complejo y presenta una variabilidad en sus características. Tanto si se trata de comprobar la solidez de una estructura existente como si el objeto del proceso es diseñar una nueva es preciso idealizar el material —o materiales— que la componen y reducir su comportamiento relevante desde el punto de vista estructural al menor número de parámetros posible.




Se trata el tema con más extensión en el apartado de sólidos deformables, pero conviene adelantar que en los procesos de análisis reduciremos los sólidos a cuatro tipos de modelo cuya representación más eficaz son los gráficos tensión/deformación: modelo rígido, modelo rígido-plástico, modelo elástico, modelo elastoplástico, empleándose a veces modelos más complejos con relaciones no lineales entre tensiones y deformaciones.

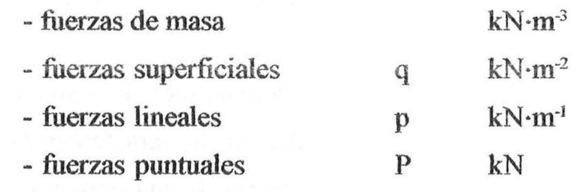
Son relevantes y expresables mediante parámetros otras variables tales como el peso específico ρ y los cambios dimensionales asociados a otros factores: la dilatación térmica y la retracción.

Son así menos relevantes otros parámetros relativos a la deformación en situaciones tensionales complejas que se verán en su momento.




Modelos de acciones

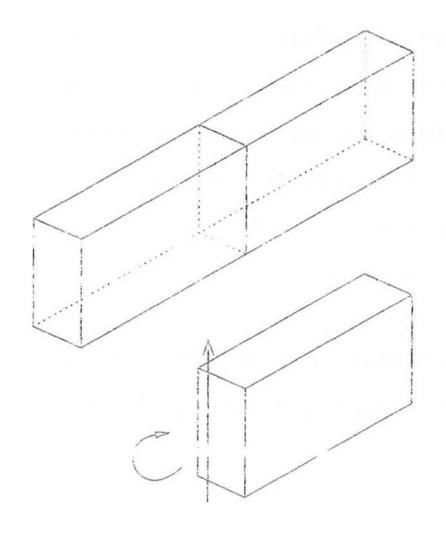
Las fuerzas que actúan sobre la estructura como consecuencia fundamentalmente de la gravedad pero también del viento, sismo y cambios dimensionales, son complejas y variables. Se usan valores estándar fijados por la normativa y se simplifican en lo posible:



- fuerzas de masa		$kN{\cdot}m^{-3}$
- fuerzas superficiales	q	$kN{\cdot}m^{-2}$
- fuerzas lineales	p	$kN{\cdot}m^{-1}$
- fuerzas puntuales	P	kN

Salvo las fuerzas de masa, el resto son simplificaciones que frecuentemente están implícitamente asociadas a un tipo de estructura.

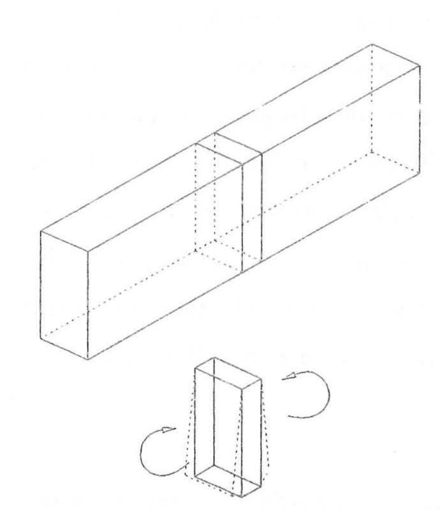
EL PROCESO DE ANÁLISIS



Una vez elegidos los modelos pertinentes el proceso de análisis consiste simplemente en expresar que la estructura y cada una de sus partes está en equilibrio.

Análisis significa corte. Cuando se cortan trozos de la estructura se sustituyen las partes eliminadas por las fuerzas que transmiten al trozo que estudiamos a través del corte. Estas fuerzas internas se llaman **solicitaciones** para distinguirlas de las **acciones** aplicadas sobre la estructura.

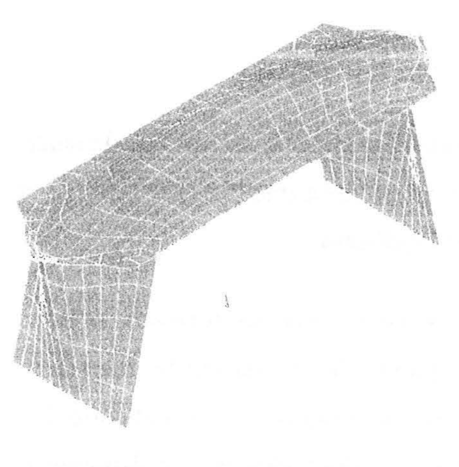
La comprobación del equilibrio global de la estructura como sólido indeformable es siempre inexcusable y puede completarse con la comprobación de equilibrios parciales.



Con frecuencia es útil realizar comprobaciones genéricas de equilibrio en las que se emplean variables que expresen mediante una función los valores de un parámetro en distintos puntos de la estructura, en cuyo caso las ecuaciones de equilibrio adquieren la forma de **ecuaciones diferenciales**.

La manera conceptualmente más económica de expresar el comportamiento de una estructura es el uso del movimiento de los grados de libertad como variables principales.

Las posibilidades de cálculo numérico que presentan los ordenadores son explotadas discretizando la estructura y sustituyendo las ecuaciones diferenciales por enormes conjuntos de ecuaciones lineales simultáneas que permiten calcular el movimiento de cientos e incluso miles de nodos de la estructura.



El proceso es tan complejo y potencialmente tan exacto como se quiera, pero escasamente necesario —incluso puede conducir a una seguridad engañosa— en las estructuras de edificación cuyo comportamiento puede predecirse con modelos más simples, más adecuados al grado real de precisión de los modelos de material —que difieren en ocasiones considerablemente del comportamiento real no siempre modelable— y a la definición normativa de las acciones —que se aparta también considerablemente de la realidad—.

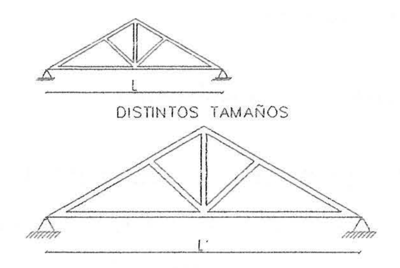
No debe olvidarse tampoco que luego la estructura debe ser construida y que este proceso implica importantes factores adicionales de imprecisión.

DISEÑO Y ANÁLISIS.

El proceso científico iniciado por Galileo en la primera mitad del s. XVII prácticamente cerrado por Timoschenko tres siglos después permite merced a lo adelantos técnicos posteriores predecir el comportamiento de cualquier estructura y por tanto comprobar si cumplirá los requisitos de resistencia, rigidez y estabilidad de una estructura previamente definida. Antes del análisis es necesario un proceso de definición del **diseño** que luego es completado con el **diseño de detalle** en el que se fijan además las especificaciones necesarias para la **construcción**.

La construcción es el fin último que debe ser siempre tenido en cuenta en todas las etapas anteriores del proceso.
El diseño no es en general un acto único sino un proceso complejo de etapas de prueba y error pero que necesita no sólo una decisión inicial sino un criterio para sucesivos ajustes.

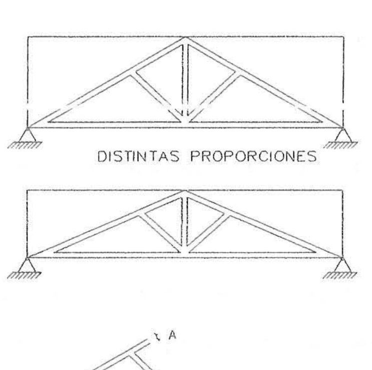
El análisis genérico de tipos de estructuras permite adquirir una información específica orientada al diseño que puede permitir elegir de forma racional entre las distintas opciones y hacer las sucesivas modificaciones en la dirección adecuada para que el proceso converja rápidamente con el menor número posible de ciclos prueba/error.



Factores relevantes del diseño.

Para tratar con precisión sobre el diseño estructural es preciso identificar los factores relevantes.

El primero es obviamente el **material**. En un objeto podemos claramente distinguir material y geometría.



Todo aquello que podamos deducir de las propiedades estructurales asociadas a una forma geométrica tendrán una mayor generalidad al ser aplicables a los distintos objetos que podamos producir al materializarla con distintos materiales.

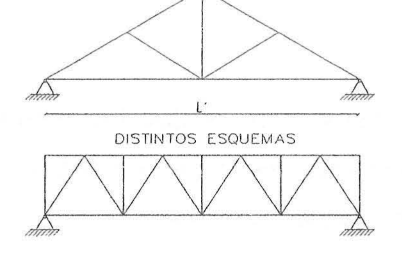
Si nos ceñimos a la geometría podemos distinguir **tamaño** y **forma**.



Un mismo dibujo puede representar objetos de cualquier tamaño sin más que cambiar la escala.

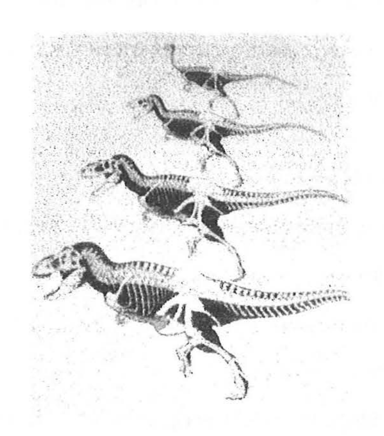
Prescindiendo de tamaño y material cabe imaginar distintas opciones de diseño que difieran tan sólo en la **proporción** que medimos mediante la **esbletez** $\lambda = L/d$

Prescindiendo también de la proporción, en lo que queda aún podemos distinguir **esquema** y **grueso**.



Quedan pues como factores relevantes: material, tamaño, proporción, grueso, esquema.

La **proporción** resulta ser un factor esencial en la eficacia estructural de un diseño y es decisiva en el cumplimiento de los requisitos de **rigidez** y **estabilidad**; aunque parezca paradójico es más importante que el esquema.



El **grueso** es el factor relevante para la **resistencia**.

Material, tamaño, esquema y proporción inciden en el volumen de material necesario para ejecutar la estructura. La definición de los factores relevantes permite aplicar el análisis a estructuras genéricas y observar las consecuencias de modificar cada uno de los factores.

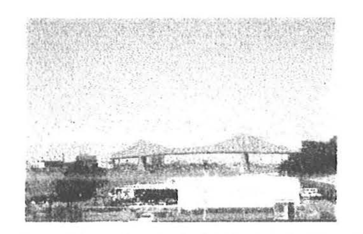
Volviendo a la observación de Galileo que aparentemente invalidaba las reglas de proporción para diseñar estructuras, podemos precisarla diciendo:

Para un esquema dado, con un material determinado y una proporción fija, las tensiones debidas al peso propio crecen inexorablemente con el tamaño.

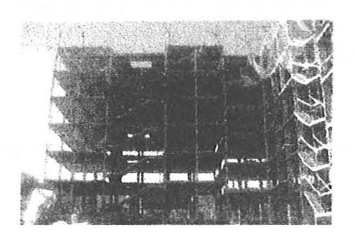
En efecto, si duplicamos el grueso de los elementos de una estructura, doblamos las secciones pero también su propio peso por lo que las tensiones serán las mismas y no hay forma de reducirlas más que cambiando esquema, material o proporción.

Si duplicamos el tamaño, las tensiones debidas al peso propio serán también inexorablemente dobles ya que se dobla la masa de la estructura manteniendo las secciones.

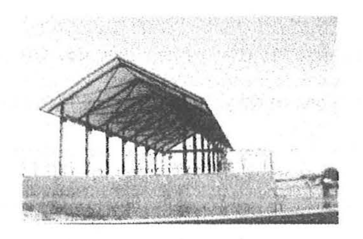
La conclusión es que para cada conjunto esquema- proporción-material, habrá un tamaño máximo insuperable, lo que avala el razonamiento de Galileo —hay que recordar además que en las estructuras de fábrica de la época el peso propio era el factor primordial de las acciones implicadas en el proceso.



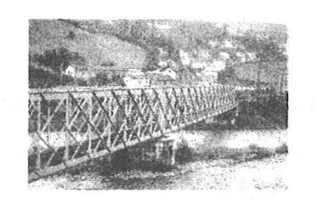
El fallo del razonamiento está en que los tamaños máximos son muy grandes, mucho mayores que las estructuras reales, que raramente superan la quinta parte de aquél; en consecuencia las tensiones reales debidas a peso propio son pequeñas. En esta situación, **una correcta proporción** es la decisión más importante para un buen diseño.



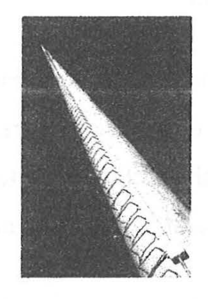
En las estructuras actuales —salvo grandes puentes— el peso propio raramente supone más de la tercera parte de las cargas implicadas lo que aumenta aún más el carácter proporcional de las soluciones y por tanto la validez de las reglas de proporción como herramienta de diseño, que no debe excluir un análisis final de la solución concreta para confirmar el diseño definitivo.



LOS CONDICIONANTES DE USO

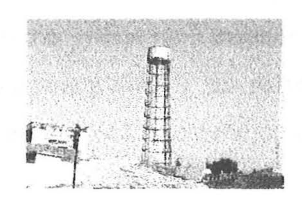


El uso condiciona fuertemente la forma de las estructuras y permite establecer una clasificación de las estructuras de edificación:

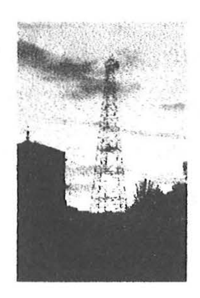


1.- Estructuras de pisos.
Suponen el mayor grado de condicionamiento formal. Consisten en una serie de planos horizontales superpuestos.

2.- Estructuras de cubierta.
Sólo tienen obligación de cubrir una superficie, sin otro condicionante adicional que la posibilidad de evacuación de la lluvia y en ocasiones la de no requerir un volumen excesivo adicional al necesario para el uso.



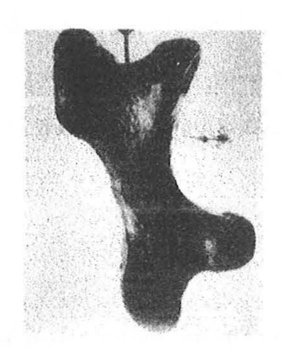
3.- Puentes.
No tienen prácticamente otro condicionante que el de unir dos puntos.



4.- Torres.
El problema es sólo colocar un punto a una cierta altura. En el límite —satélites artificiales— ni siquiera precisan estructura sacando partido de una situación de equilibrio dinámico.

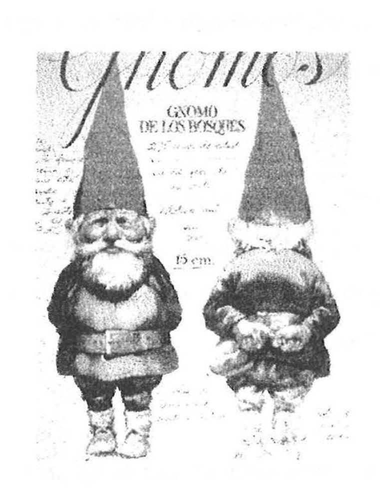
En el caso de los seres vivos, la observación de Galileo es perfectamente aplicable a los animales terrestres ya que su masa depende del cubo del tamaño mientras que la sección de huesos y músculos sólo depende del cuadrado.

El volumen necesario para el sistema estructural varía con la cuarta potencia del tamaño.



La simple observación de la fotografía de un hueso aún sin referencia al tamaño permite deducir si pertenecía a un animal grande o pequeño, lo que es afortunado ya que los animales pequeños necesitan gastar más volumen en otras funciones vitales que no pueden reducirse mucho tales como la vista o el oído.

El cambio de tamaño de un diseño tiene curiosas consecuencias: un insecto aumentado de escala se aplastaría por su propio peso al llegar a los 20 cm de tamaño.



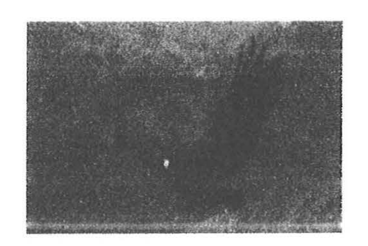
Por el contrario un hombre u otro animal reducido de escala sería capaz de correr o saltar lo mismo que antes de la reducción y tendría una capacidad estructural excelente que le permitiría soportar cargas enormes en relación con su tamaño.

Las propiedades físicas atribuidas por el folclore a los duendes, capaces de correr y saltar de manera impropia a su tamaño son precisamente las que deberían ser; y dado que son difícilmente deducibles suponen un argumento a favor de su existencia real.

Los árboles tienen como principal problema estructural el efecto del viento, aproximadamente proporcional a la superficie y que crece por tanto con el cuadrado del tamaño, lo que hace que un diseño proporcional sea adecuado.

Los animales marinos prácticamente están sólo sometidos a fuerzas de superficie por lo que sus soluciones estructurales son sensiblemente proporcionales: los peces no cambian la forma ni la proporción del sistema estructural al crecer; las ballenas son una buena prueba de que no existen limitaciones estructurales al movimiento en el medio acuático.

Por el contrario en el caso de las aves el equilibrio dinámico que implica el vuelo asocia un tamaño preciso a cada forma, razón por la cual los pájaros crecen a gran velocidad alcanzando el tamaño de los adultos en pocos días.



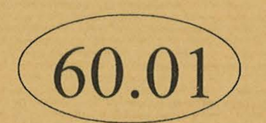
La necesidad de crecimiento rápido hace de las aves jóvenes unos excelentes transformadores del alimento en proteínas. Es pues una razón estructural lo que hace que la carne de pollo sea barata: son tres veces más eficaces en la producción de carne que el ganado vacuno

NOTAS

NOTAS

NOTAS

CUADERNO



CATÁLOGO Y PEDIDOS EN
http://www.aq.upm.es/of/jherrera
jherrera@aq.upm.es

